

# Impacto de la bioestimulación con nanopartículas de ZnO y el poliacrilato de potasio en la producción de pimiento bajo estrés hídrico

ZnO nanoparticles and potassium polyacrylate bioestimulation impact on pepper production under hydric stress

Jose Antonio Rios Peña<sup>1</sup> , Alonso Méndez López<sup>2\*</sup> , Antonio Juárez Maldonado<sup>2</sup> , Miriam Sánchez Vega<sup>4</sup>   
, Alberto Sandoval Rangel<sup>5</sup> , Susana González Morales<sup>6</sup> , Rebeca Betancourt Galindo<sup>7</sup> 

<sup>1</sup> Doctorado en Ciencias en Agricultura Protegida, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>2</sup> Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>4</sup> Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>5</sup> Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>6</sup> CONAHCYT, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315, Saltillo, Coahuila, México.

<sup>7</sup> Departamento de materiales avanzados, Centro de Investigación en Química Aplicada, Blvd. Enrique Reyna Hermosillo 140, C.P. 25294. Saltillo, Coahuila, México.

## RESUMEN

El agua es un recurso esencial cuya disponibilidad va en disminución, siendo el sector agrícola uno de los principales consumidores. La nanotecnología y polímeros superabsorbentes tiene el potencial de mejorar la eficiencia en el uso del agua y facilitar la producción de alimentos en condiciones adversas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto bioestimulante de las nanopartículas de ZnO y el poliacrilato de potasio, como retenedor de agua, en la producción de pimientos bajo condiciones de estrés hídrico. Se analizaron parámetros como la eficiencia del uso del agua, el rendimiento, la calidad de los frutos, las características fisiológicas de las plantas y las propiedades del sustrato. Los tratamientos aplicados mejoraron la eficiencia en el uso del agua, incrementaron el rendimiento y redujeron la oxidación-reducción al activar el sistema de defensa antioxidante, lo que disminuyó el impacto del estrés hídrico, especialmente bajo un régimen de riego del 50 %. Estos resultados sugieren que la combinación de NPs ZnO y E. A. puede ser una estrategia efectiva para optimizar el uso del agua en la producción de pimientos. Los resultados son prometedores para un entorno controlado de invernadero. Sin embargo, se requiere realizar más investigación para confirmar estos efectos en condiciones de campo.

**Palabras clave:** Gestión del agua; bioestimulante; retenedor de agua.

## ABSTRACT

Water is an essential resource which availability is decreasing, with the agricultural sector being one of the main consumers. Nanotechnology and superabsorbent polymers have the potential to improve water use efficiency and facilitate food production under adverse conditions. The objective of this work was to evaluate the biostimulant effect of ZnO

nanoparticles and potassium polyacrylate, as a water retainer, in pepper production under water stress conditions. Parameters such as water use efficiency, yield, fruit quality, plant physiological characteristics and substrate properties were analyzed. The applied treatments improved water use efficiency, increased yield and reduced oxidation-reduction by activating the antioxidant defense system, which reduced the effects of water stress, especially under a 50 % irrigation regime. These results suggest that the combination of ZnO NPs and E. A. may be an effective strategy to optimize water use in pepper production.

**Keywords:** Water management; biostimulant; water retainer.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad la escasez del agua se debe a la alta demanda en áreas urbanas, la sobreexplotación de acuíferos y la contaminación. El cambio climático ha empeorado la situación al reducir las lluvias, cambios de patrón o estacionalidad, lluvias torrenciales, entre otros, especialmente en regiones secas y semi secas. Esta situación impacta principalmente en la agricultura, que utiliza el 70 % del agua a nivel mundial (González-Morales y Ramón-Ojeda, 2019; Almadani y Mostafa, 2021). El déficit hídrico del suelo puede afectar negativamente a la productividad de los cultivos al alterar procesos fundamentales como la fotosíntesis, la transpiración y la apertura de estomas, lo que limita el crecimiento, el desarrollo y el rendimiento de los cultivos (Toor *et al.*, 2020).

A nivel celular, un desequilibrio en el metabolismo de la planta puede resultar en un aumento de la producción de especies reactivas del oxígeno (ROS) y una disminución del sistema de defensa antioxidante (Taha *et al.*, 2020), ocasionando alteración en la función celular normal, y en caso extremo daños irreversibles en lípidos, ácidos nucleicos y proteínas. Esto induce en la planta un estado de estrés oxi-

\*Autor para correspondencia: Alonso Méndez López,

Correo-e: alonso1977@gmail.com

Recibido: 14 de mayo de 2024

Aceptado: 17 de septiembre de 2024

Publicado: 17 de octubre de 2024

dativo celular (Calatayud *et al.*, 2015). En el pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.), un cultivo de gran importancia económica y particularmente sensibles al agotamiento de agua debido a su extensa área foliar y alta conductancia estomática, el déficit hídrico puede causar complicaciones en el cuajado de los frutos, lo que conduce a la reducción del rendimiento del cultivo (Moreno y Patricia, 2009).

Por ello, se buscan nuevas alternativas para mitigar el impacto negativo de las condiciones ambientales sobre las plantas, tal es el caso de los bioestimulantes (Du Jardin, 2015). En este sentido, las nanopartículas han demostrado mejorar el rendimiento del cultivo, reduciendo la pérdida de nutriente y los impactos ambientales negativos (Liu y Lal, 2014). Otra alternativa es el uso de polímeros superabsorbentes de agua, como el poliacrilato de potasio, para aumentar la disponibilidad y absorción de agua en el suelo (Montesano *et al.*, 2015).

La implementación de tecnologías innovadoras que mejoren la gestión del agua puede permitir a los cultivos desarrollar estrategias de tolerancia a su escasez sin afectar la producción de alimentos. Por tal razón, el presente trabajo tuvo como objetivo determinar el efecto bioestimulante con nanopartículas de ZnO y el poliacrilato de potasio como retenedor de agua en la producción de pimiento bajo estrés hídrico.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del experimento

El experimento se realizó en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en Saltillo, Coahuila, México, en un invernadero tipo túnel con cubierta de policarbonato, pared húmeda y ventilación mediante extractores, con coordenadas geográficas 25°35'55.13" Norte y 101°03'09.72" Oeste con 1750 msnm. Se empleó semilla de pimiento morrón *Capsicum annuum* híbrido Deseo F1 de la empresa de semillas Clause. El experimento tuvo una duración de cinco meses, desde julio hasta diciembre de 2022.

### Síntesis de las nanopartículas de ZnO

Las nanopartículas de ZnO fueron sintetizadas en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). En ese proceso se empleó acetato de zinc dihidrato ( $\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , ZnAc, 99 %), trietilamina TEA (99 %) y propilamina (99 %) como precursores en la síntesis de nanopartículas de ZnO, todos los insumos adquiridos en Sigma Aldrich. Además, se empleó etanol y agua destilada.

De acuerdo con González *et al.* (2021), se disolvieron 8.9 g de acetato de zinc dihidratado en 150 mL de agua desionizada en un matraz de tres bocas equipado con sistema de agitación y calentamiento. Se añadieron 1.78 mL de trietanolamina y 0.472 mL de n-propilamina disueltos en etanol al 99.5 %, logrando una mezcla homogénea. La reacción se llevó a cabo a 75 °C durante 6 horas. El producto resultante se centrifugó a 15,000 rpm, se lavó tres veces con etanol y se dejó secar durante 24 h antes de su almacenamiento.

### Poliacrilato de potasio

El poliacrilato de potasio fue proporcionado por Fertilex S.A. de C.V., este contiene cristales de polímeros superabsorbentes aniónicos de poliacrilamida. Son copolímeros reticulados de acrilamida y acrilato de potasio que pueden absorber hasta 400 veces su peso en agua, convirtiéndose en geles.

### Determinación de las necesidades hídricas del sustratos

Para determinar las necesidades de agua de la planta, se empleó el método gravimétrico, que implica reponer el agua perdida por evapotranspiración (Segura-Castruita *et al.*, 2011). Esto se calculó utilizando la ecuación siguiente:

$$\text{Evaporación} = P^1 - P^2 \quad (\text{Ec. 1})$$

$P^1$  representa el peso inicial de la maceta (después de saturarla con agua y permitir el drenaje durante 20 minutos),  $P^2$  es el peso de la maceta después de 24 horas. El resultado final indica la cantidad de agua consumida por la planta en mililitros. Las mediciones se tomaron por la mañana (8:00 a 10:00 h) antes del inicio de la evaporación del sustrato y la transpiración de la planta. Se establecieron tres niveles de riego: 100 % (sin estrés hídrico), 50 % (estrés hídrico severo) y 25 % (estrés hídrico muy severo). Esta evaluación se realizó semanalmente y permitió ajustar los niveles de riego según la necesidad y demanda propia de la etapa fenológica de las plantas para mantener estables los tratamientos.

### Procedimiento experimental en plantas de pimiento morrón

Las semillas de pimiento se germinaron en charolas de poliestireno de 200 cavidades con una mezcla de peatmoss y perlita en proporción 1:1 (v/v). Tras 40 días de su emergencia, el 4 de julio de 2022 se trasplantaron a macetas de plástico negro de 10 L, manteniendo la misma mezcla de peatmoss y perlita. Durante los 150 días que duró el experimento, se aplicó una solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) mediante riego por goteo. Cada tratamiento recibió 250 mL de riego durante los primeros 15 días posteriores al trasplante, para posteriormente mantener los tres regímenes de riego hasta finalizar el experimento.

### Establecimiento del experimento

El experimento se llevó a cabo mediante un diseño de parcelas divididas en bloques completos al azar. En este diseño, el régimen de riego (100 %, 50 % y 25 %) fue asignado a la parcela principal, mientras que el tratamiento (C: control; E. A.: Poliacrilato de Potasio; NPs ZnO: Nanopartículas de Óxido de Zinc; E. A. + NPs ZnO: Poliacrilato de Potasio + Nanopartículas de Óxido de Zinc) fue asignado a la subparcela. Esto resultó en un total de 12 tratamientos con 4 repeticiones. Cada unidad experimental consistió en dos macetas, que recibieron la misma concentración y método de aplicación para las nanopartículas de ZnO y el poliacrilato de potasio. En este diseño, los dos factores de variación fueron el régimen de riego y el tratamiento aplicado.



### Caracterización de las NPs ZnO

La morfología de las nanopartículas se observó utilizando un microscopio electrónico de transmisión de alta resolución, revelando nanopartículas esféricas de aproximadamente 20.63 nm.

### Eficiencia del uso del agua

Para determinar la Eficiencia del Uso del Agua (EUA) se siguió la metodología propuesta por Fernández y Camacho (2005), modificada por Salazar-Moreno, *et. al* (2014), indicando que para evaluar EUA, se sustituye el rendimiento, ya sea por fruto o total en kg del producto por m<sup>3</sup> de agua utilizada.

$$Ef\ agua = \frac{\text{Producción (kg)}}{\text{Agua utilizada (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

Esto se refleja directamente en los valores de EUA, donde un incremento en el rendimiento total o en el rendimiento por fruto, con el mismo consumo de agua, sugiere una mayor eficiencia en el uso del agua.

### Evaluación de variables de rendimiento

La evaluación de los parámetros de productividad (rendimiento total, peso por fruto y número de frutos) comenzó 80 días después del trasplante, cuando el 50 % de los frutos habían adquirido un color amarillo brillante y estaban firmes al tacto. El peso de cada fruto se registró individualmente con una balanza digital (VINSON®) y se expresó en kilogramos. El rendimiento total se calculó sumando el peso de todos los frutos por planta.

### Parámetros de calidad del fruto

La calidad del fruto se evaluó en el tercer fruto de cada planta, se midieron variables como Firmeza (FZA), sólidos solubles totales (SST), pH, potencial de oxidación-reducción (ORP), acidez titulable (AT), conductividad eléctrica (CE), diámetro polar de fruto (DP) y ecuatorial de fruto (DE). La firmeza se evaluó con un penetrómetro manual (Wagner Instruments, modelo FDK 20, Greenwich, CT, EE. UU.). Los sólidos solubles totales se determinaron a partir del extracto de fruta macerada y se leyeron con un refractómetro digital (HI96801, Hanna Instruments Inc.). El pH, la conductividad eléctrica (CE) y el potencial de oxidación-reducción (ORP) se midieron utilizando un sensor digital (HANNA®). La acidez titulable se determinó utilizando 10 mL de pulpa de cada fruto, a los cuales se añadieron dos gotas de fenoltaleína al 1 %. Posteriormente, se realizó una titulación con NaOH 0.1 N hasta alcanzar el punto de viraje (color rosa) según el método descrito por la AOAC (1990). El diámetro polar y ecuatorial del fruto se midieron con un calibrador vernier (STEREN®).

### Parámetros fisiológicos de la planta y propiedades físico-químicas del Sustrato

Se midió el potencial hídrico de la hoja ( $\Psi_h$ ) utilizando una bomba de presión Scholander (Soil Moisture Equipment Corp®, Mod. 3115, Goleta, CA, EE. UU.) siguiendo la metodolo-

gía de (Scholander *et al.* 1964). Las mediciones se realizaron al mediodía durante las etapas de floración y producción en hojas completamente desarrolladas. La conductividad eléctrica (CE) del sustrato se midió saturándolo con agua hasta drenaje y tomando una lectura con un potenciómetro (HANNA®).

### Análisis Estadístico

El experimento constó de 12 tratamientos con 4 repeticiones (2 plantas por unidad experimental) distribuidos bajo un diseño de parcelas divididas en bloques al azar. Para el análisis de datos se utilizó el software Infostat 2020 (InfoStat 2020; Córdoba, Argentina). Se realizó un análisis de varianza (Valor de p) y en los parámetros que se detectó diferencias estadísticas significativas se aplicó una prueba de comparación de medias (Tukey  $p \leq 0.05$ ).

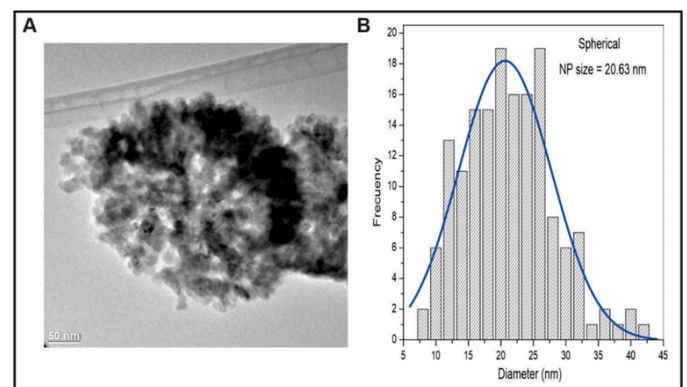
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de las NPs ZnO

El histograma muestra una distribución de tamaños de partícula de 7.5 a 42.5 nm, con un promedio de 20 nm (Figura 1) previamente reportados por García *et al.* (2023), y similar a las NPs ZnO obtenidas por Awan *et al.* (2021), principalmente esféricas con un tamaño de partícula de 24 nm, lo que garantiza la estabilidad del producto.

### Eficiencia del uso del agua

La eficiencia en el uso del agua, mide la cantidad de biomasa producida por unidad de agua utilizada Salazar-Moreno *et al.* (2014). La Tabla 1 presenta los resultados de la relación gramos de fruto producido por cada litro de agua consumido tanto para el rendimiento total como en el rendimiento por fruto. El análisis estadístico ( $\alpha \leq 0.05$ ) mostró diferencias significativas en la EUA por cada fruto producido. Específicamente en las parcelas con estrés hídrico al 25 % y 50 %, tratadas con NPs ZnO y E. A.+ NPs ZnO. En la parcela al 25 %, el tratamiento E. A.+ NPs ZnO promovió una mayor EUA, logrando un rendimiento de  $3.85 \pm 0.09$  g de fruto por litro de agua consumido por planta. Este rendimiento superó a



**Figura 1.** Morfología esférica de las nanopartículas de ZnO (A) e histograma de distribución de tamaños (B) (Magdaleno-García *et al.*, 2023).

**Figure 1.** Spherical morphology of ZnO nanoparticles (A) and the corresponding size distribution histogram (B) (Magdaleno-García *et al.*, 2023)

**Tabla 1.** EUA en plantas de pimiento bajo estrés hídrico, tratadas con nanopartículas de ZnO y E. A.**Table 1.** WUE in pepper plants under water stress, treated with ZnO and E. A. nanoparticles.

Parcela Regimen de riego	Tratamientos	EUA/P*F (g fruit <sup>-1</sup> L <sup>-1</sup> )	EUA/RT (g plant <sup>-1</sup> L <sup>-1</sup> )
25 %	Control	3.39 b	14.55 bc
	E. A.	3.30 b	16.19 bc
	NPs ZnO	3.06 bc	12.49 c
	E. A.+NPs ZnO	3.85 a	18.92 abc
50 %	Control	2.69 d	20.53 abc
	E. A.	2.87 cd	26.71 ab
	NPs ZnO	3.24 b	32.11 a
	E. A.+NPs ZnO	3.17 bc	22.35 abc
100 %	Control	1.57 e	13.81 bc
	E. A.	1.65 e	18.66 bc
	NPs ZnO	1.50 e	17.27 bc
	E. A.+NPs ZnO	1.71 e	20.82 abc
	V.C. (%)	5.04	26.02
	Valor de p	0.0001	0.0893

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Tukey ( $\alpha \leq 0.05$ ). Eficiencia del uso del agua (EUA); peso por fruto (P\*F); rendimiento total por planta (RT); tratamientos bajo tres regímenes de riego (25 %, 50 % y 100 %); plantas con la aplicación de 5 g de un producto comercial de poliacrilato de potasio incorporado al sustrato de la maceta (E. A.); aplicación foliar de nanopartículas de ZnO a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>, se realizaron seis aplicaciones con un intervalo de quince días a partir del trasplante (NPs ZnO); tratamientos combinados (E. A. + ZnO).

los tratamientos 25 % C, 50 % C y 100 % C en un 13.56 %, 43.00 % y 145.22 %, respectivamente. En la parcela con estrés del 50 %, los tratamientos con NPs ZnO y E. A. + NPs ZnO incrementaron la eficiencia del uso del agua en un 16.98 % y un 15.15 %, respectivamente, comparado con el control de la parcela al 50 %.

En cuanto a la EUA para el rendimiento total, no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, la parcela sometida al 50 % de estrés hídrico tratada con NPs ZnO, logró una EUA de  $32 \pm 3.14$  g de fruto por cada litro de agua utilizada en la planta superando al control sin déficit hídrico en un 132.51 %. Este resultado indica que se requieren aproximadamente 31 litros de agua para que la planta produzca un kilogramo de frutos de pimiento. Esto sugiere un impacto positivo en el rendimiento, gracias a la mejora en la eficiencia del uso del agua, promovida por la

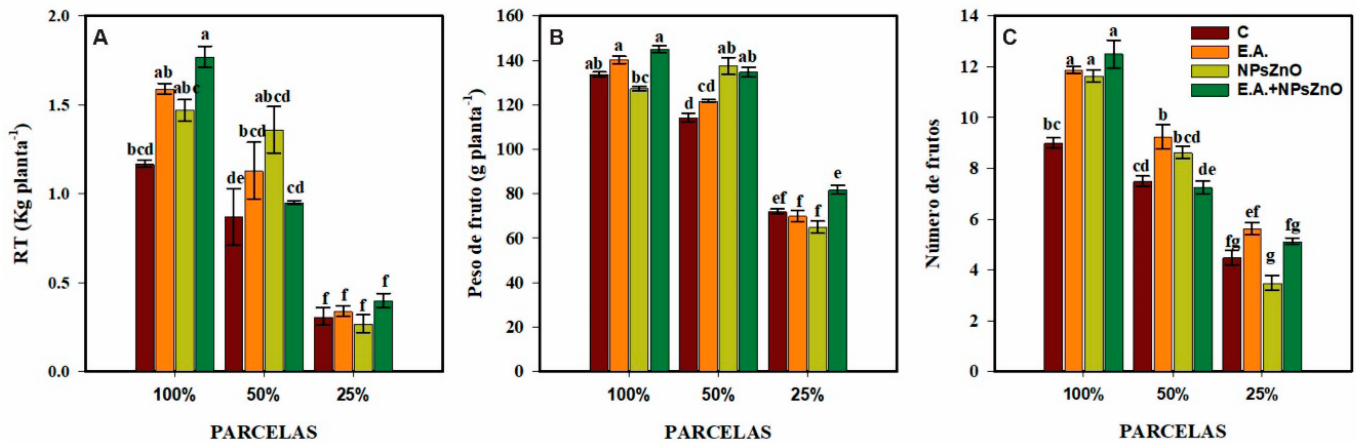
optimización de la presión osmótica atribuida a la acción de las nanopartículas de ZnO. Estudios han demostrado que las nanopartículas aplicadas en plantas mitigan el estrés inducido por el déficit de agua al promover la agregación de osmolitos, mejorando la adaptación osmótica y estimulando el equilibrio hídrico de los cultivos (Alabdallah *et al.*, 2021).

### Evaluación de variables relacionadas con el rendimiento

En la Figura 2 se reportan los resultados de variables relacionadas con el rendimiento. Los análisis estadísticos indican que todas las variables presentan diferencias significativas ( $\alpha \leq 0.05$ ). El tratamiento más eficiente en términos de rendimiento total fue 100 % E. A. + NPs ZnO, el cual aumentó su rendimiento de frutos a  $1.77 \pm 0.06$  kg-planta<sup>-1</sup> en comparación con el control 100 % ( $1.17 \pm 0.02$  kg-planta<sup>-1</sup>). En la parcela tratada al 25 % de estrés hídrico, en general se registraron los rendimientos de fruto más bajos, estos oscilaron entre  $0.27 \pm 0.05$  y  $0.40 \pm 0.04$  kg-planta<sup>-1</sup>. En la parcela al 50 % de estrés hídrico tratada con NPs ZnO, produjo  $1.36 \pm 0.13$  kg-planta<sup>-1</sup>, superando al control en un 56 % y sin presentar diferencia estadística significativa con respecto al control al 100 %.

La variable peso del fruto mostró un efecto positivo con la aplicación de los tratamientos, ya que los frutos presentaron un mayor peso en las parcelas con un suministro hídrico del 100 % y del 50 %, siendo estadísticamente superiores a las parcelas con un suministro hídrico del 25 %. Los mayores pesos de frutos se obtuvieron con los tratamientos control 100 % ( $133.75 \pm 1.03$  g), 100 % E. A. ( $140.25 \pm 1.65$  g), 100 % E. A.+NPs ZnO ( $145.00 \pm 1.63$  g), 50 % NPs ZnO ( $137.5 \pm 3.86$  g), y 50 % E. A.+NPs ZnO ( $134.75 \pm 2.06$  g), sin mostrar diferencias estadísticas significativas entre ellos. En la parcela con estrés hídrico al 25 %, los frutos presentaron pesos entre  $81.75 \pm 1.89$  g y  $65.00 \pm 2.74$  g, lo que representa una disminución del 47.79 % en el peso promedio del fruto. Estos resultados sugieren que las nanopartículas de ZnO (NPs ZnO) promueven una mayor eficiencia osmótica y una actividad fotosintética más alta en las plantas. Combinadas con la mayor capacidad de retención de agua del poliacrilato de potasio en el sustrato, las condiciones de estrés hídrico al 50 %, tratadas con nanopartículas de ZnO y E. A., permiten que los frutos alcancen pesos comparables a los obtenidos en condiciones óptimas de riego.

El número de frutos por planta se vio afectado por el régimen de estrés hídrico al que fueron sometidas las plantas y por los tratamientos. El mayor número de frutos por planta se registró en la parcela con riego al 100 %, con un incremento del 28 % de más frutos con la aplicación de E. A. + NPs ZnO, 24.25 % con E. A. y 22.62 % con NPs ZnO, respecto al control (100 % C) con 9 frutos-planta<sup>-1</sup>. El menor número de fruto-planta<sup>-1</sup> se registró en la parcela al 25 % con un rango de  $3.50 \pm 0.29$  a  $5.63$  frutos-planta<sup>-1</sup>. En la parcela con riego al 50 %, los tratamientos 50 % E. A. y 50 % NPs ZnO no presentaron diferencias estadísticas con el control al 100 %. Este resultado sugiere que tanto las nanopartículas de ZnO como el poliacrilato de potasio aplicados en condiciones de estrés hídrico



Las diferentes letras en las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Tukey ( $\alpha \leq 0.05$ ). Rendimiento total (A); Peso de fruto (B); Numero de fruto (C); tratamientos bajo tres regímenes de riego (100 %, 50 % y 25 %); control (C); plantas con la aplicación de 5 g de un producto comercial de poliacrilato de potasio incorporado al sustrato de la maceta (E. A.); aplicación foliar de nanopartículas de ZnO a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>, se realizaron seis aplicaciones con un intervalo de quince días a partir del trasplante (NPs ZnO); tratamientos combinados (E. A. + NPs ZnO).

**Figura 2.** Evaluación de la productividad en plantas de pimientos bajo estrés hídrico tratados con nanopartículas de ZnO y E. A. 2022.

**Figure 2.** Productivity evaluation in bell pepper plants under water stress treated with ZnO and E. A. nanoparticles. 2022.

al 50 %, tienen la capacidad de estimular la producción y alcanzar el rendimiento en condiciones óptimas de riego.

El zinc es esencial para las plantas, ya que participa en reacciones metabólicas vitales, como la síntesis de proteínas y la formación de carbohidratos durante la fotosíntesis. Además, el zinc contribuye al mantenimiento e integridad de las membranas celulares, lo que ayuda a mitigar los efectos negativos del estrés hídrico (Ramírez-Rodríguez *et al.*, 2023). En este sentido, Rivera-Gutiérrez *et al.* (2021) informaron un aumento del 32 % en el rendimiento del melón con aplicaciones foliares de NPs ZnO. Por otro lado, Uresti-Porras *et al.* (2021) encontraron que la aplicación foliar de NPs ZnO aumentó significativamente el peso, número y tamaño de los frutos en plantas de pimiento injertadas.

Por otro lado, los hidrogeles se han sugerido para mejorar la disponibilidad de agua y reducir el consumo hasta en un 50 % (Rivera-Fernández y Gallo, 2018). Recinos y Renato (2013) evaluaron el poliacrilato de potasio en el cultivo de frijol para mitigar el estrés por sequía, encontrando un aumento en la productividad en comparación con los tratamientos que no lo recibieron.

### Evaluación de variables de calidad de fruto

Los resultados de calidad del fruto se muestran en la Tabla 2, donde todas las parcelas y tratamientos mostraron diferencias estadísticas significativas para las variables evaluadas, excepto para el diámetro ecuatorial. Las parcelas bajo regímenes de riego del 50 % y 100 % presentaron frutos con una firmeza promedio de  $4.07 \pm 0.27$  a  $4.63 \pm 0.20$  kg cm<sup>-2</sup>. En la parcela al 25 %, los tratamientos E. A. + NPs ZnO y NPs ZnO superaron al control en un 31.57 % y 30.57 %, respectivamente. En la concentración de sólidos solubles totales, se observó un aumento en los frutos provenientes de plantas con déficit hídrico, indicativo de una respuesta antiestrés. Aunque se detectaron diferencias significativas en el pH y la conductividad eléctrica (CE) entre los tratamientos, no se observó una

tendencia clara, lo que sugiere que estas variables también se ven afectadas por el estrés hídrico, pero no muestran una respuesta consistente a la aplicación de NPs ZnO ni al poliacrilato de potasio. La acidez titulable disminuyó en los frutos provenientes de plantas manejadas en la parcela a 100 % de régimen hídrico (a capacidad de campo), con valores entre 0.18 y 0.20 % de ácido cítrico. En la parcela a 50 % de régimen hídrico, el tratamiento con poliacrilato de potasio presentó un valor de 0.17 %, lo que representa un 29.17 % menor que su control respectivo. En esta misma parcela, para la variable diámetro polar, el tratamiento E. A. + NPs ZnO mostró un calibre similar al control de 50 % y ambos no presentaron diferencias estadísticas con el control de la parcela con riego al 100 % (6.93 cm).

El estrés en las plantas ocasionado por la salinidad del suelo, afecta la calidad de los frutos. Un ejemplo de ello se presentó en tomates cultivados en suelos con una conductividad eléctrica de 8 dS m<sup>-1</sup>, como respuesta los frutos presentaron un aumento en los niveles de azúcares y ácido cítrico (Navarro-López *et al.*, 2012). Sin embargo, el uso de algunos bioestimulantes como sustancias húmicas logran reducir la acidez titulable, mejorando así el sabor y la calidad nutricional de los frutos (Villegas-Espinoza *et al.*, 2018).

El ORP, es un parámetro que indica la capacidad antioxidante y es clave en la calidad del fruto (Cano-Hernández *et al.*, 2016). En las plantas manejadas en la parcela en condición de 25 % de suministro hídrico, el poder antioxidante de los frutos se vió ampliamente afectado. Efecto contrario se observó en los frutos provenientes de plantas con 50 % de estrés hídrico, el tratamiento testigo presentó un ORP de  $-3.50 \pm 0.50$  mV, en esta misma parcela, los tratamientos con NPs ZnO ( $-21.75 \pm 0.48$  mV), E. A. ( $-25 \pm 0.91$  mV) y su combinación ( $-14.75 \pm 0.25$  mV) mostraron valores más bajos, lo que indica una menor oxidación-reducción, mejorando la calidad nutracéutica de los frutos. Estudios sugieren que las nanopartículas aumentan compuestos bioactivos como

fenoles y flavonoides en frutos bajo condiciones de estrés (Montaño-Herrera, 2023). Además, estudios indican que el uso de polímeros superabsorbentes mejoran la calidad y rendimiento de los frutos en plantas de tomate, aumentando nutrientes, pigmentos y hormonas, así como reduciendo la peroxidación lipídica y el contenido de peróxido de hidrógeno (Başak, 2020).

### Variables fisiológicas de la planta y propiedades fisicoquímicas del sustrato

La condición de sequía elevan la salinidad del suelo, lo que provoca un desequilibrio osmótico y en el potencial hídrico, afectando el contenido de agua en las plantas. Para compensar la pérdida de agua, las plantas mantienen un potencial hídrico más negativo que el sustrato para facilitar la absorción (Rodríguez-Ledesma *et al.*, 2019). En la figura 3 se presentan los resultados del potencial hídrico foliar durante las etapas de floración y producción, junto con la conductividad eléctrica del sustrato. Se detectan diferencias significativas en el potencial hídrico en ambas etapas según el análisis de varianza ( $\alpha \leq 0.05$ ). Durante la floración, en la parcela a 25 % de suministro hídrico, el tratamiento control experimentó una disminución de  $-5.73 \pm 0.45$  MPa mientras que los tratamientos E. A., E. A. + NPs ZnO y NPs ZnO registraron valores de  $-3.03 \pm 0.08$ ,  $-2.98 \pm 0.32$  y  $-1.98 \pm 0.20$  MPa, en comparación con representa un aumento del 47.13 %, 48.0 % y un 65.45 %, respectivamente. En la parcela a 50 % de suministro hídrico, los tratamientos con NPs ZnO y E. A., presentaron un aumento del 28.61 % y 47.68 % con respecto al control correspondiente. En tanto que, en la parcela al 100 %, el tratamiento con NPs ZnO aumento el potencial hídrico foliar en un 52.17 % en comparación con el control correspondiente.

Para la etapa de producción, se muestra una disminución significativa en el tratamiento control en las tres parcelas (25 %, 50 % y 100 %), con valores promedio de  $-4.62 \pm 0.24$ ,  $-4.60 \pm 0.14$  y  $-4.22 \pm 0.27$  MPa respectivamente. En contraste, las

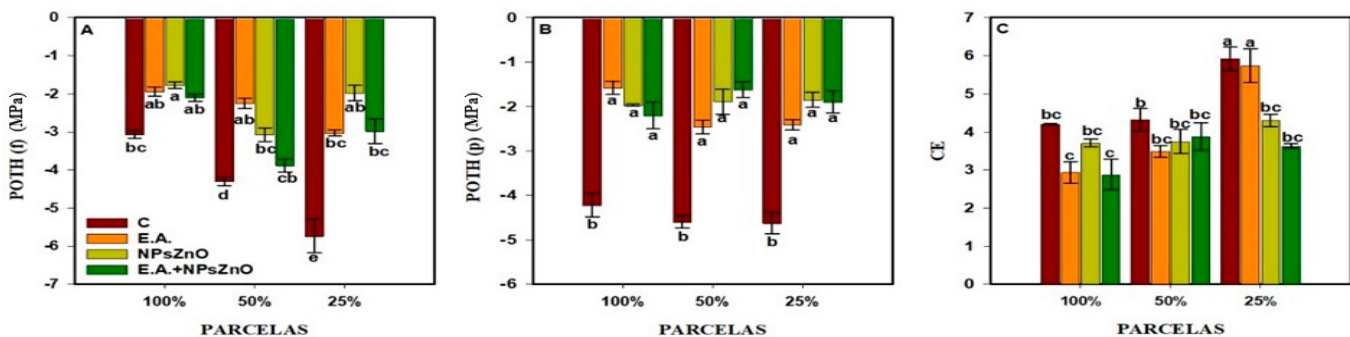
plantas tratados con NPs ZnO y poliacrilato de potasio, tanto en forma individual como en combinación, mantuvieron un potencial hídrico estable, oscilando entre  $-1.58 \pm 0.15$  y  $-2.46 \pm 0.16$  MPa.

Las NPs ZnO mejoran la tolerancia al estrés hídrico al activar el sistema de defensa antioxidante en las plantas permitiendo la disminución de la expresión de ROS mejorando la calidad de los frutos. En este sentido, los compuestos fenólicos juegan un papel importante en el sistema no enzimático (Magdaleno-García *et al.*, 2023). Cuando la planta sufre estrés por metales pesados, en este caso debido a las NPs ZnO, los compuestos fenólicos pueden actuar como agentes quelantes de metales o suprimir las ROS (Michalak, 2006; Magdaleno-García *et al.*, 2023). Por otro lado, los nanocompuestos Grafeno-Cu en tomates bajo estrés biótico infectados con *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici* demostró mejorar hasta un 31.7 % el potencial hídrico (Cota-Ungson *et al.*, 2023).

El poliacrilato de potasio, un polímero superabsorbente, reduce el estrés hídrico al liberar gradualmente agua durante el crecimiento de las plantas. Según Liu y Chan (2015), su uso en el suelo aumenta el contenido de agua y la supervivencia del pasto Bermuda en invernadero.

Se observa un aumento en la CE del sustrato en tratamientos con mayor restricción de agua; sin embargo, disminuye en los tratamientos con aplicación de E. A., siendo más baja en la parcela a 100 % y más alta en la parcela al 25 %. Los tratamientos 100 % E. A. y 100 % E. A. + NPs ZnO lograron una disminución del 31.95 % y 33.34 %, comparado con el control de la parcela al 100 %; mientras que los tratamientos en la parcela al 50 % de riego no mostraron una diferencia significativa.

El pimiento prefiere suelos bien aireados pero es sensible a la salinidad, lo que afecta el rendimiento si la CE supera los  $3.4 \text{ dS m}^{-1}$  (Yagudin y Rolandovich, 2018). Los hidrogeles, como enmiendas, mejoran las propiedades físicas del suelo, reduciendo la CE y la pérdida de agua por percolación o eva-



Las diferentes letras en las barras indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Tukey ( $\alpha \leq 0.05$ ). Potencial hídrico en etapa de floración (A); potencial hídrico en etapa de producción (B); conductividad eléctrica del sustrato (CE); tratamientos bajo tres regímenes de riego (100 %, 50 % y 25 %); control (C); plantas con la aplicación de 5 g de un producto comercial de poliacrilato de potasio incorporado al sustrato de la maceta (E. A.); Aplicación foliar de nanopartículas de ZnO a una concentración de  $0.5 \text{ g L}^{-1}$ , se realizaron seis aplicaciones con un intervalo de quince días a partir del trasplante (NPs ZnO); tratamientos combinados (E. A. + NPs ZnO).

**Figura 3.** Evaluación de variables fisiológicas de la planta y propiedades fisicoquímicas del sustrato.

**Figure 3.** Evaluation of physiological parameters of the plant and physicochemical properties of the substrate.

**Tabla 2.** Evaluación de parámetros de calidad del fruto en plantas de pimiento bajo estrés hídrico tratadas con nanopartículas de ZnO y E. A.  
**Table 2.** Evaluation of fruit quality parameters in bell pepper plants under water stress treated with ZnO and E. A. nanoparticles.

Parcela Regimen de riego	Tratamiento	FZA (kg cm <sup>-2</sup> )	SST (°Brix)	pH	ORP	AT (% ac. cítrico)	CE	DP (cm <sup>-1</sup> )	DE (cm <sup>-1</sup> )
25 %	Control	2.84 c	7.05 a	5.35 ab	-6.75 b	0.28 ab	1.93 e	5.38 d	5.83 c
	E. A.	3.46 bc	7.15 a	5.36 ab	-6.00 ab	0.27 abc	3.05 ab	5.50 d	5.83 c
	NPs ZnO	4.09 ab	6.90 ab	5.37 ab	-4.00 a	0.24 a-e	3.08 abc	6.50 bcd	6.20 abc
	E. A.+NPs ZnO	4.15 ab	7.15 a	5.30 ab	-5.00 ab	0.31 a	3.28 ab	6.78 abc	6.28 abc
50 %	Control	3.77 ab	6.18 bc	5.11 b	-3.50 a	0.25 a-d	3.44 a	7.93 a	7.13 a
	E. A.	4.40 a	4.88 d	5.50 a	-25 f	0.17 e	2.93 ab	5.50 d	5.98 bc
	NPs ZnO	4.07 ab	5.35 cd	5.36 ab	-21.75 ef	0.21 b-e	2.76 bcd	6.13 cd	6.15 abc
	E. A.+NPs ZnO	4.37 ab	5.60 cd	5.42 a	-14.75 cd	0.24 b-e	3.17 abc	7.45 ab	6.48 abc
100 %	Control	4.35 ab	5.50 cd	5.32 ab	-13.75 cd	0.19 de	2.60 cd	6.93 abc	6.65 abc
	E. A.	4.46 a	4.40 e	5.39 ab	-10.50 bc	0.18 e	2.61 cd	7.80 a	6.85 abc
	NPs ZnO	4.63 a	4.80 de	5.35 ab	-18.00 de	0.18 e	2.92 ab	7.00 abc	7.13 a
	E. A.+NPs ZnO	4.61 a	5.00 de	5.48 a	-13.00 cd	0.20 cde	2.45 de	7.63 ab	6.95 ab
	C.V. (%)	8.46	5.36	2.19	19.36	12.27	8.20	7.21	6.46
	Valor de p	0.0048	0.0003	0.0468	0.0001	0.0158	0.0001	0.0114	0.1348

Diferentes letras en las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con Tukey ( $\alpha \leq 0.05$ ). Firmeza (FZA); sólidos solubles totales (SST); potencial de hidrogeno (pH); potencial de oxidación-reducción (ORP); ácidos titulable (AT); conductividad eléctrica (CE); diámetro polar (DP); diámetro ecuatorial (DE); tratamientos bajo tres regímenes de riego (25 %, 50 % y 100 %); plantas con la aplicación de 5 g de un producto comercial de poliacrilato de potasio incorporado al sustrato de la maceta (E. A.); aplicación foliar de nanopartículas de ZnO a una concentración de 0.5 g L<sup>-1</sup>, se realizaron seis aplicaciones con un intervalo de quince días a partir del trasplante (NPs ZnO); tratamientos combinados (E. A. + NPs ZnO).

poración (Gómez, 2015).

## CONCLUSIONES

La aplicación de nanopartículas de ZnO (NPs ZnO) y el poliacrilato de potasio (E. A.), ya sea de manera individual o combinada, tiene efectos positivos en la mitigación del estrés hídrico en plantas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). Las NPs ZnO fomentaron la tolerancia al estrés hídrico al regular el metabolismo de las plantas, mientras que el poliacrilato de potasio contribuyó a la retención de agua en el sustrato, reduciendo los efectos adversos del déficit hídrico. Ambos tratamientos mejoraron la eficiencia en el uso del agua, incrementaron el rendimiento de frutos por litro de agua utilizada, especialmente bajo condiciones de riego al 50 %. Además, la aplicación de NPs ZnO y E. A. redujo la oxidación-reducción y mejoró la calidad nutracéutica de los frutos, evidenciando un aumento en la capacidad antioxidante. El uso de polímeros superabsorbentes, también, redujo la conductividad eléctrica del suelo, previno la acumulación de sales y mejoró la disponibilidad de agua para los procesos metabólicos de las plantas. Sin embargo, se requieren más análisis para precisar el impacto de los tratamientos, particularmente en relación con el suministro de agua. Se recomienda explorar diferentes concentraciones de NPs ZnO y E. A. para identificar las condiciones óptimas que maximicen la eficiencia hídrica en la producción de alimentos, dado el creciente problema de escasez de este recurso vital.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAH-CYT) por el apoyo brindado a través de una beca. Este respaldo financiero fue crucial para llevar a cabo la investigación presentada en este artículo. Su contribución ha sido invaluable y nos ha permitido avanzar en el conocimiento científico en nuestro campo de estudio.

## CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## REFERENCIAS

- AOAC. 1990. Official methods of analysis: in K. Helrich (Ed.). 15th ed. Arlington, VA, USA.
- Alabdallah, N.M. Hasan, M.M., Hammami, I., Alghamdi, A.I., Alshehri, D. y Alatawi, H.A. 2021. Green synthesized metal oxide nanoparticles mediate growth regulation and physiology of crop plants under drought stress. *Plants*. 10(8): 1730.
- Almadani, B. y Mostafa, S.M. 2021. IIoT based multimodal communication model for agriculture and agro-industries. *IEEE Access*. 9: 10070-10088.
- Awan, S., Shahzadi, K., Javad, S., Tariq, A., Ahmad, A., y Ilyas, S. 2021. A preliminary study of influence of zinc oxide nanoparticles on growth parameters of *Brassica oleracea* var *italica*. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 20(1): 18-24.
- Başak, H. 2020. The effects of super absorbent polymer application on the physiological and biochemical properties

- of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) plants grown by soilless agriculture technique. Applied Ecology and Environmental Research. 18(4):5907-5921.
- Calatayud, Á., Penella, C., Penella, V., Marsal, J.I., Bonet, L., Nebauer, S.G. y López-Galarza, S. 2015. Respuesta de las plantas injertadas de pimiento en condiciones de estrés hídrico. Influencia del injerto y del patrón. Agrícola Vergel. 381: 84-86.
- Cano-Hernández, M., Bennet-Eaton, A., Silva-Guerrero, E., Robles-González, S., Sainos-Aguirre, S. y Castorena-García, H. 2016. Caracterización de bioles de la fermentación anaeróbica de excretas bovinas y porcinas. Agrociencia. 50(4): 471-479.
- Cota-Ungson, D., González-García, Y., Cadenas-Pliego, G., Alpuche-Solís, Á.G., Benavides-Mendoza, A. y Juárez-Maldonado, A. 2023. Graphene-Cu nanocomposites induce tolerance against *Fusarium oxysporum*, increase antioxidant activity, and decrease stress in tomato plants. Plants. 12(12): 2270.
- Du Jardin, P. 2015. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. Scientia Horticulturae. 196: 3-14.
- Magdaleno-García, G., Juárez-Maldonado, A., Betancourt-Galindo, R., González-Morales, S., Sánchez-Vega, M. y Méndez-Lopez, A. 2023. Zinc oxide nanoparticle morphology modify germination and early growth of bell pepper seedlings: Zinc oxide nanoparticle morphology. Biotecnia. 25(3): 5-15.
- Michalak, A. 2006. Phenolic compounds and their antioxidant activity in plants growing under heavy metal stress. Polish Journal of Environmental Studies. 15(4): 523-530.
- Gómez, J.S. 2015. Characterization and effects of cross-linked potassium polyacrylate as soil amendment. University of Seville. Seville, Spain.
- González, S.E., Bolaina-Lorenzo, E., Pérez-Trujillo, J.J., Puente-Urbina, B.A., Rodríguez-Fernández, O., Fonseca-García, A., y Betancourt-Galindo, R. 2021. Antibacterial and anticancer activity of ZnO with different morphologies: a comparative study. 3 Biotech. 11: 1-12.
- González-Morales, A. y Ramón-Ojeda, A.Á. 2019. La desalación de agua de mar en las Canarias Orientales: los casos de Lanzarote y Fuerteventura. Agua y Territorio / Water and Landscape. 13: 15-26.
- Liu, R. y Lal, R. 2014. Synthetic apatite nanoparticles as a phosphorus fertilizer for soybean (*Glycine max*). Scientific Reports, 4(1): 5686.
- Liu, X. y Chan, Z. 2015. Application of potassium polyacrylate increases soil water status and improves growth of bermudagrass (*Cynodon dactylon*) under drought stress condition. Scientia Horticulturae. 197: 705-711.
- Montaño-Herrera, A. 2023. Efecto de la fertilización edáfica y aplicación foliar con nanopartículas de Cu, Se, Fe, y Zn sobre el rendimiento y calidad poscosecha de *Malus domestica* L. y *Pyrus communis* L. Tesis de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Montesano, F.F., Parente, A., Santamaria, P., Sannino, A., y Serio, F. 2015. Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 4: 451-458.
- Moreno, F. y Patricia, L. 2009. Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. Agronomía Colombiana, 27(2): 179-191.
- Navarro-López, E.R., Nieto-Ángel, R., Corrales-García, J., García-Mateos, M.D.R. y Ramírez-Arias, A. 2012. Calidad poscosecha en frutos de tomate hidropónico producidos con agua residual y de pozo. Revista Chapingo. Serie Horticultura. 18(3): 263-277.
- Ramírez-Rodríguez, S.C., Ortega-Ortiz, H., González-Morales, S. y Preciado-Rangel, P. 2023. Nanopartículas de quitosán mejoran el rendimiento, actividad enzimática y compuestos bioactivos en frutos de tomate. Revista Terra Latinoamericana, 41.
- Recinos, A. y Renato, J. 2013. Evaluación del poliacrilato de potasio, en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), como práctica de adaptación a la amenaza de sequía, Parramos, Chimaltenango. Doctoral dissertation. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Rivera-Fernández, R.D. y Gallo, F.M. 2018. Absorción de agua de hidrogel de uso agrícola y su humedecimiento de tres tipos de suelo. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. 50(2): 15-21.
- Rivera-Gutiérrez, R.G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P. y Orozco-Vidal, J.A. 2021. Nanopartículas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 12(5): 791-803.
- Rodríguez-Ledesma, N.D., Torres-Sevillano, C.N., Chaman-Medina, M.E. y Hidalgo-Rodríguez, J.E.M. 2019. Efecto del estrés salino en el crecimiento y contenido relativo del agua en las variedades IR-43 y amazonas de *Oryza sativa* "arroz" (Poaceae). Arnelo, 26(3): 931-942.
- Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A. y López-Cruz, I.L. 2014. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. Tecnología y Ciencias del Agua. 5(2): 177-183.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Hemmingsen, E.A. y Bradstreet, E.D. 1964. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. Proceedings of the National Academy of Sciences, 52(1): 119-125.
- Segura-Castruita, M.Á., Ramírez-Seañez, A.R., García-Legaspi, G., Preciado-Rangel, P., García-Hernández, J.L., Yescas-Coronado, P., Fortis-Hernández, M., Orozco-Vidal, J.A. y Montemayor-Trejo, J.A. 2011. Desarrollo de plantas de tomate en un sustrato de arena-pómez con tres diferentes frecuencias de riego. Revista Chapingo. Serie horticultura, 17(SPE1): 25-31.
- Steiner, A.A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. Plant and Soil. 15: 134-154.
- Taha, R.S., Alharby, H.F., Bamagoos, A.A., Medani, R.A. y Rady, M.M. 2020. Elevating tolerance of drought stress in *Ocimum basilicum* using pollen grains extract; a natural biostimulant by regulation of plant performance and antioxidant defense system. South African Journal of Botany. 128: 42-53.
- Toor, M.D., Adnan, M., Javed, M.S., Habibah, U., Arshad, A., Din, M.M. y Ahmad, R. 2020. Foliar application of Zn: Best way to mitigate drought stress in plants; A review. International Journal of Applied Research. 6(8): 16-20.
- Uresti-Porras, J.G., Cabrera-De-La Fuente, M., Benavides-Mendoza, A., Olivares-Sáenz, E., Cabrera, R.I. y Juárez-Maldonado, A. 2021. Effect of graft and nano ZnO on nutraceutical and mineral content in bell pepper. Plants. 10(12): 2793.
- Villegas-Espinoza, J.A., Reyes-Pérez, J.J., Nieto-Garibay, A., Ruiz-Espinoza, F.H., Cruz-Falcón, A. y Murillo-Amador, B. 2018. Biostimulant Liplant®: its effect on *Solanum lycopersicum* (L.) grown on slightly saline soils. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 9(SPE20): 4137-4147.
- Yagudin, H. y Rolandovich, I. 2018. Efecto de la aplicación de microorganismos eficientes (me) y fitomas-e® en la producción de plántulas de pimiento (*Capsicum annuum* L.). Thesis. Universidad de Matanzas. Facultad de Ciencias Agropecuarias.